

## · 文献综述 ·

机器人辅助经自然腔道内镜手术的研究现状与展望<sup>\*</sup>阎于珂 综述 邹书兵<sup>\*\*</sup> 审校

(南昌大学第二附属医院肝胆胰外科, 南昌 330006)

中图分类号: R61; TP24

文献标识: A

文章编号: 1009-6604(2014)06-0563-05

doi: 10.3969/j.issn.1009-6604.2014.06.026

腹腔镜和介入内镜在临床的成功应用开创了微创领域的全新时代, 经自然腔道内镜手术(natural orifice transluminal endoscopic surgery, NOTES)巧妙地将腔镜手术和内镜技术融合, 再次翻开了微创外科的新篇章。NOTES 的发展必然伴随技术的创新, 尽管前进的道路上仍有挑战, 但 NOTES 已取得令人瞩目的成绩。近年来, 机器人技术的蓬勃发展, 开创了机器人辅助手术的新时代, 有研究者将其应用到 NOTES 中, 为相关问题的解决带来了希望。本文对目前机器人在 NOTES 中的研发现状和应用进展做一综述, 旨在提高对机器人辅助 NOTES 技术的了解。

## 1 NOTES 及手术机器人的发展简史

以腹腔镜手术为代表的微创外科在临床各专业领域的广泛应用, 在解除疾患的同时, 追求手术更微创和更美观已成为外科医生的主旋律, 在这种理念的激励下 NOTES 随之出现。2004 年 Kalloo 等<sup>[1]</sup>在动物模型成功经胃置入软镜完成腹腔探查及肝脏活检术, 之后 NOTES 以崭新的手术理念迅速发展起来, 激发了全球外科医生和内镜医生的研究兴趣。为促进 NOTES 更顺利的研究和推行, 2005 年美国胃肠内镜学会(American Society of Gastrointestinal Endoscopy, ASGE)和胃肠内镜外科医师学会(Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons, SAGES)的 14 位专家成立了经自然腔道手术研究和评估协会(natural orifice surgery consortium for assessment and research, NOSCART), 并于次年发表 NOTES 白皮书<sup>[2]</sup>, 指明面对的挑战和未来的发展方向等问题。2007 年 Marescaux 等<sup>[3]</sup>完成了人体经阴道胆囊切除术, 这次手术堪称 NOTES 从动物实验走向临床应用的转折点, 更将其推向了临床实践的

高潮。时至今日, NOTES 初步的临床实践已显露出术后疼痛轻、腹腔粘连少、恢复时间快和腹壁无瘢痕等优势, 同时也从简单操作延伸至相对复杂的手术<sup>[4,5]</sup>, 有学者预言这项新技术将是继腹腔镜微创手术之后又一次外科史上的里程碑, 被誉为第三次手术革命<sup>[6,7]</sup>。

与此同时, 机械电子系统、计算机辅助技术和微米/纳米科学的迅猛兴起, 掀起了机器人辅助微创外科的一场新革命。1985 年人类首次将工业机器人 PUMA560 引进手术室协助术者导向定位进行脑组织活检, 此后用于前列腺切除术的机器人 PROBOT 和髋关节置换术的机器人 ROBODOC 相继开发并获得应用, 开创了机器人外科的先河<sup>[8]</sup>。众多研究机构以极大的热情投身于手术机器人的制造中, 其中最受关注的是 Intuitive Surgical 公司的 Da Vinci 机器人<sup>[9]</sup>, 其将硬性内镜同机器人技术相结合, 并集成导航、定位、遥控操作等多项技术, 在临床开展各类手术<sup>[10,11]</sup>, 成为目前世界上应用最广泛、最成功的手术机器人。在硬镜领域将机器人技术从理论转换为实践的同时, NOTES 的出现让软镜技术得到了腾跃式的突破, 更大地拓展内镜治疗的领地, 但传统的内镜器械平台已无法满足 NOTES 的需求, 而机器人与软性内镜的结合无疑为其发展助一臂之力, 不仅能提供稳定、舒适的手术平台, 还可以辅助完成精细的内镜手术, 规范操作方式, 实现远程手术, 更以 NOTES 特有的手术入径和操作空间给予研制具有临床实用性的机器人平台奠定了基础, 并为体内手术机器人的应用提供了可能。

## 2 机器人应用于 NOTES 的研发现状及应用进展

完善的器械平台对于 NOTES 的临床应用和长远发展起着至关重要的作用。起初传统的软性内镜

<sup>\*</sup> 基金项目: 江西省卫生厅重大科技计划项目(No:20094005)<sup>\*\*</sup> 通讯作者, E-mail: zousb999@163.com

因管形很好地匹配生理腔道被广泛使用,但操作中的视觉角度不稳定、操作三角难暴露、器械互相易干扰等缺陷证明其尚不足以实施复杂的 NOTES。基于现有内镜平台的缺点,医用机器人的出现使上述问题迎刃而解,机器人技术让 NOTES 的操作更灵活和精准,安全性获得最大保障。虽然目前 NOTES 的机器人系统方兴未艾,但势必会推动 NOTES 未来的进展。

## 2.1 MASTER 手术机器人系统

主从式腔道内镜机器人 (Master and slave transluminal endoscopic robot, MASTER) 是 Phee 等<sup>[12]</sup>研发于 NOTES 的新型机器人平台 (图 1)。MASTER 是一种缆绳驱动的柔性双臂操作系统,由控制台、远程手术工作站和机械臂组成,手术时连接到传统的内镜孔道置入人体腔道内,需要内镜医生以及机器人操作医生协作手术。MASTER 控制台通过电缆与末端的机械臂相连接,术者将手臂放置其内操纵,通过传感器和机器编码传递到机械臂末端的 2 个效应器 (抓钳和电钩),使其拥有 9 个自由度,用来执行不同位置、方向和空间的手术操作。伴随触觉反馈传感器、介入导航系统 (术前 CT/MRI/DSA 影像系统、术中视觉三维重建系统和磁性导向系统) 的逐步完善,MASTER 维持空间定位将更加精确,使 NOTES 将变得更容易导向和控制,术者可清楚地辨认脏器周围的结构,避免医源性损伤的发生,并降低手术并发症和操作复杂性。MASTER 已成功用于猪模型下行内镜黏膜下剥离术和肝楔形切除术<sup>[13,14]</sup>,表现出良好的抓持、剪切和稳定操作三角的能力,并使得操作容易和精准。目前, Phee 等<sup>[15]</sup>已应用 MASTER 成功施行人体早期胃肿瘤黏膜下剥离术。然而,MASTER 多为实验研究,缺乏大样本存活动物实验和临床实践评估,并且存在术者同机械臂运动滞后的缺陷,我们期待 MASTER 能够克服目前的缺点,逐步过渡到 NOTES 的临床应用中。

## 2.2 ViaCath 腔内手术机器人

ViaCath 是 EndoVia Medical 开发的适用于腔道内 NOTES 的远程遥控式机器人<sup>[16]</sup> (图 2),包括主控制台与手术操作台。医生操作的主控制台具有触觉控制介面,手术操作台则是由一长条形且可弯曲的铰接机器臂所建构而成,此机械臂的末端效应器是 2 个手术器械和一个镜头,可供医生在控制台操作和观看病人体内画面。随着 ViaCath 的研发,机械臂效应器已拥有了 9 个自由度,使其操作范围进一步扩大。ViaCath 已被用于在存活的猪模型施行内镜黏膜切除术,表现出缺乏腔内空间定位、有限的抓钳能力和无法充分的暴露操作三角等劣势,同样

是作为一种电缆驱动柔性系统,操作的延迟和运动的滞后仍会发生。然而,源于 ViaCath 提供简易灵活的交互操作模式等优势,已有学者开发出新的柔性机器人系统 (Sensei robotic system),并成功应用于心房颤动 (房颤) 和肾结石的治疗 (图 3)。用于房颤消融可显著减少术者所受电离辐射时间及总手术时间,在即刻、中期随访成功率和并发症方面优于人工消融;泌尿系结石的应用虽为个案,但术者成功施行远程操作,手术成功率和并发症不亚于传统手术<sup>[17,18]</sup>。临床实践的结果鼓舞人心,希望 ViaCath 逐步完善,尽快转变到 NOTES 的研发应用中。

## 2.3 i-Snake 机器人

i-Snake 机器人应用仿生蛇形原理和先进的成像、传感技术,旨在提供一个平台来扩展 NOTES 的应用范围<sup>[19]</sup>。i-Snake 是一种可曲、灵巧的铰链式机器人,包括近端的致动控制组件,硬性传动轴和远端具有 7 个自由度铰链部分,能有效地进行空腔内外操作且无须腹腔镜辅助。i-Snake 最大的特点在于结合了铰链式机器人和手控机械设备两者的优势,同时应用混合肌腱式直线微电机技术,灵敏地根据术者控制进行准确运动,能够增强成像和传感功能。i-Snake 内部由 3 个工作通道组成,一个通道用于放置标准的内镜摄像头,其余 2 个通道置入各种内镜器械便于术中的抓钳、分离和剪切。在存活动物实验中,i-Snake 已成功完成经阴道腹腔探查术和输卵管结扎术 (图 4),有限的组织操作能力和维持操作三角是其缺陷,目前尚未见人体实践应用的报告。

## 2.4 体内微型机器人

2.4.1 成像机器人 Oleynikov 等<sup>[20]</sup>设计出新型体内成像机器人并应用于 NOTES,它被固定在一个折叠式三脚架平台,由 LED 提供照明,2 个独立的永磁直流电机提供驱动,允许以 45° 2 个不同平面旋转倾斜并提供 360° 水平视角,能显示额外的视野使术者安全地在腹腔操作,机器人已成功应用于犬和猪的实验模型<sup>[21]</sup> (图 5)。在此基础上, Rentschler 等<sup>[22]</sup>研发出 NOTES 平台的移动成像机器人,由 2 个独立驱动的螺旋形轮和 1 个可调节的聚焦图像传感器组成,能在腹腔内提供视觉反馈和增强深度感知,并在不损伤组织的前提下直行和翻转运动,目前已在猪模型证明其有效性;同时将活检钳和移动成像机器人相结合,可在腹腔探查的同时行组织活检<sup>[23]</sup>,进一步增强机器人的作用 (图 6)。磁固定导向系统 (magnetic anchoring and guidance system, MAGS) 的出现更加稳定了成像机器人系统, Lehman 等<sup>[24]</sup>利用磁力吸引开发出腹膜式成像机器人,体内机器人部分与体外磁铁相吸并固定于体内,通过控制体外部分可以对体内部分的方向、视角、位置等加

以控制。成像机器人使 NOTES 在术中得到更优的可视化视角,提高了手术安全性,为 NOTES 多功能机器人的研发奠定了基础。

**2.4.2 手术机器人** 成像模块和操作工具共同配备让微型机器人的功能更加完善。①Shah 等<sup>[25]</sup>介绍了经胃置入腹腔的多功能手术机器人平台,具备组织牵拉、抓取、灼烧和立体成像的能力(图 7)。该平台由微型双臂机器人、磁体系统和控制台组成,机器人借助内镜胃造瘘后进入腹腔,借助磁体系统实现定位和固定,通过外部磁体控制面板操纵内部机械臂完成手术操作。Lehman 等<sup>[26]</sup>为增强机器人的便捷性和灵活性,将腹腔镜控制手柄连接到末端操作臂,使其拥有 6 个自由度并具备模仿人类关节运动的功能,有效地将术者手臂运动传递到机器人,该机器人已用于动物进行腹腔探查、胆囊和小肠切除<sup>[27]</sup>。②NOTES 操作入路的独特性,使多个微型机器人通过解剖腔道置入腹腔成为可能,不同的机器人都须各司其职,协作配合,统一接受体外操纵以完成腔内操作。Lehman 等<sup>[24]</sup>已在动物模型验证了多个协作机器人的可行性(图 8),通过胃肠内镜将成像、照明、牵引操作机器人放入腹腔,通过控制体外磁性操作柄实现定位、固定和操纵内部机器人,显

示出稳定的成像、充足的视野和多重的组织操纵能力等优势。③MAGS 技术和器械的愈发成熟(图 8),使 NOTES 术中精确定位、最适术野、对抗牵引等需求有效解决。在体外控制平台磁力的作用下,体内的机器臂可以获得最大的移动范围和精准切割的能力,使手术更安全有效。目前, MAGS 已成功应于猪模型的经阴道胆囊切除术和肾脏切除术<sup>[28,29]</sup>,表现出较好的应用前景。

**2.4.3 重组机器人** 无线控制技术的成熟使模块化机器人在 NOTES 中得到发展,每个机器人依次连接组成模块系统,经解剖腔道进入腹腔后,由术者操纵外部控制器启动无线模块机器人自我装配和进行手术(图 9)。通常一组模块系统包括一个中央主体模块,多重结构模块和功能模块,同组的模块化机器人可被组装成几种不同拓扑结构在腹腔内执行不同的任务,完成手术后机器人可拆解成单独的模块天然排泄。重组机器人的设计不仅降低了每个模块的大小,而且还能够很方便地在操作过程中添加和更换不同的功能模块。Zygomalas 等<sup>[30]</sup>基于模块化机器人的理念开发出一个创新的 NOTES 机器人平台,将多个模块在胃肠道内整合完成手术操作,将给现有的手术方式新的挑战。

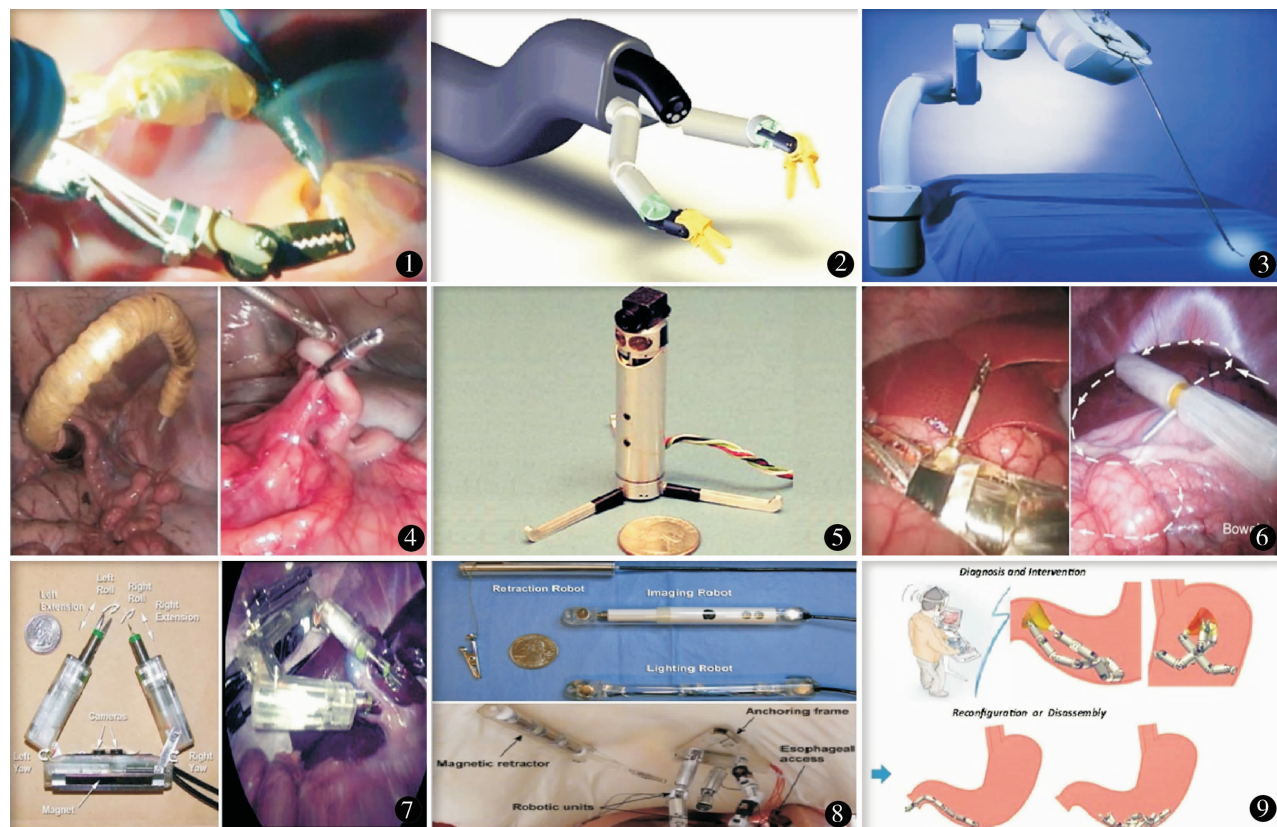


图 1 MASTER 手术机器人机械臂 图 2 ViaCath 腔内手术机器人 图 3 Sensei robotic system  
图 4 i-Snake 经阴道 NOTES 图 5 成像机器人 图 6 移动成像及活检机器人 图 7 手术机器人和胆囊切除术 图 8 协作机器人和 MAGS 平台 图 9 重组机器人

### 3 机器人辅助 NOTES 的未来展望

医疗机器人的诞生和迅速发展,正是现代外科不断追求微创和精准的具体表现,而 NOTES 的出现预示着即将到来的微创领域新纪元。初步的探索让 NOTES 得到了人们的认可,但新式器械平台的研发迟缓制约了其向更复杂的外科手术的拓展,也成为其临床应用和未来发展的瓶颈,然而手术机器人技术的成熟为 NOTES 的发展指引了新的方向,机器人技术的辅助不仅克服传统软镜的局限性<sup>[31]</sup>,更将体内手术机器人变为现实。目前的实验研究已表明 NOTES 机器人系统的有效可行性,但安全应用于临床仍需要在以下几个方面进行深入研究:①加强力触觉反馈系统提高手术安全性。Wang 等<sup>[32]</sup>通过对内镜器械的改进使术者不仅可以提供给机械臂适当的力量,而且能够感觉到组织的不同特性。②改善腔内空间定向降低手术并发症,三维图像能够在生理腔道内提供更精确的导向,Höller 等<sup>[33]</sup>设计出新型的集成实时三维表面模块的内镜,使 NOTES 的操作更顺利,同时超声内镜的应用可以准确地探查周边的脏器,避免误伤。③开发微型化的手术机器人,使其能更好的应用于腔内手术。Smith 等<sup>[34]</sup>展望把“电子黏土(Claytronics)”技术同 NOTES 相融合,电子黏土原子(catoms)通过生理腔道到达手术部位后组装成相应手术的机器人执行操作,之后自行拆卸排除。④研发具备多功能传感器的智能化手术机器人,不仅能够在术者的控制下精确完成手术操作,而且可以在术中检测腹腔内各种生理指标。总之,NOTES 的机器人操作系统已初见雏形,但多数仍处于实验阶段,欲使其顺利发展和临床应用,仍需要内镜医师、外科医师和器械工程师的共同努力。

### 4 结语

随着机器人辅助 NOTES 技术的不断发展与创新应用,NOTES 技术也越发成熟与完善。历经十多年的发展,NOTES 新式器械平台的研发已取得突破性的进展,但临床中亟待安全简便而行之有效的工具为 NOTES 的广泛开展治疗提供辅助和支持。上述的机器人技术虽在实验中各显优势,但临床应用需要大样本的观察和证实。我们相信 NOTES 作为新生事物的出现有其强大生命力,无疑是微创手术和内镜治疗的一次革命,尽管尚处在发展的初期,但随着机器人技术逐步的解决技术难题,定会使其在临床的应用顺利开展,同时 NOTES 必会在微创外科领域得到快速发展。

### 参考文献

1 Kallou AN, Singh VK, Jagannath SB, et al. Flexible transgastric

peritoneoscopy: a novel approach to diagnostic and therapeutic interventions in the peritoneal cavity. *Gastrointest Endosc*, 2004, 60 (1): 114 – 117.

2 ASGE/SAGES Working Group on Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery White Paper October 2005. *Gastrointest Endosc*, 2006, 63 (2): 199 – 203.

3 Marescaux J, Dallemagne B, Perretta S, et al. Surgery without scars: report of transluminal cholecystectomy in a human being. *Arch Surg*, 2007, 142 (9): 823 – 826.

4 Arezzo A, Zornig C, Mofid H, et al. The EURO-NOTES clinical registry for natural orifice transluminal endoscopic surgery: a 2-year activity report. *Surg Endosc*, 2013, 27 (9): 3073 – 3084.

5 Bingener J, Ibrahim-Zada I. Natural orifice transluminal endoscopic surgery for intra-abdominal emergency conditions. *Br J Surg*, 2014, 101 (1): e80 – e89.

6 Kobiela J, Stefaniak T, Mackowiak M, et al. NOTES-third generation surgery. Vain hopes or the reality of tomorrow? *Langenbecks Arch Surg*, 2008, 393 (3): 405 – 411.

7 Bucher P, Pugin F, Ostermann S, et al. Population perception of surgical safety and body image trauma: a plea for scarless surgery? *Surg Endosc*, 2011, 25 (2): 408 – 415.

8 Kalan S, Chauhan S, Coelho RF, et al. History of robotic surgery. *J Robotic Surg*, 2010, 4 (3): 141 – 147.

9 Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery: from AESOP® and ZEUS® to da Vinci®. *J Visc Surg*, 2011, 148 (5 Suppl): e3 – e8.

10 Puntambekar S, Agarwal G, Joshi SN, et al. Robotic oncological surgery: our initial experience of 164 cases. *Indian J Surg Oncol*, 2012, 3 (2): 96 – 100.

11 叶波, 冯键, 陈铭, 等. 达芬奇机器人纵隔肿物切除术 23 例临床分析. *中国微创外科杂志*, 2013, 13 (5): 392 – 393, 397.

12 Phee SJ, Low SC, Sun ZL, et al. Robotic system for no-scar gastrointestinal surgery. *Int J Med Robot*, 2008, 4 (1): 15 – 22.

13 Wang Z, Phee SJ, Lomanto D, et al. Endoscopic submucosal dissection of gastric lesions by using a master and slave transluminal endoscopic robot: an animal survival study. *Endoscopy*, 2012, 44 (7): 690 – 694.

14 Phee SJ, Ho KY, Lomanto D, et al. Natural orifice transgastric endoscopic wedge hepatic resection in an experimental model using an intuitively controlled master and slave transluminal endoscopic robot (MASTER). *Surg Endosc*, 2010, 24 (9): 2293 – 2298.

15 Phee SJ, Reddy N, Chiu PW, et al. Robot-assisted endoscopic submucosal dissection is effective in treating patients with early-stage gastric neoplasia. *Clin Gastroenterol Hepatol*, 2012, 10 (10): 1117 – 1121.

16 Karimyan V, Sodergren M, Clark J, et al. Navigation systems and platforms in natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES). *Int J Surg*, 2009, 7 (4): 297 – 304.

17 Canes D, Lehman AC, Farritor SM, et al. The future of NOTES instrumentation: Flexible robotics and in vivo minirobots. *J Endourol*, 2009, 23 (5): 787 – 792.

18 Aron M, Desai MM. Flexible robotics. *Urol Clin North Am*, 2009, 36 (2): 157 – 162.

19 Vitiello V, Lee SL, Cundy TP, et al. Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2013, 6: 111 – 126.

20 Oleynikov D, Rentschler M, Hadzialic A, et al. Miniature robots

- can assist in laparoscopic cholecystectomy. Surg Endosc, 2005, 19 (4):473-476.
- 21 Rentschler ME, Oleynikov D. Recent in vivo surgical robot and mechanism developments. Surg Endosc, 2007, 21(9):1477-1481.
- 22 Rentschler ME, Dumpert J, Platt SR, et al. Mobile in vivo camera robots provide sole visual feedback for abdominal exploration and cholecystectomy. Surg Endosc, 2006, 20(1):135-138.
- 23 Rentschler ME, Dumpert J, Platt SR, et al. Mobile in vivo biopsy and camera robot. Stud Health Technol Inform, 2006, 119:449-454.
- 24 Lehman AC, Berg KA, Dumpert J, et al. Surgery with cooperative robots. Comput Aided Surg, 2008, 13(2):95-105.
- 25 Shah BC, Buettner SL, Lehman AC, et al. Miniature in vivo robotics and novel robotic surgical platforms. Urol Clin North Am, 2009, 36(2):251-263.
- 26 Lehman AC, Wood NA, Farritor S, et al. Dexterous miniature robot for advanced minimally invasive surgery. Surg Endosc, 2011, 25 (1):119-123.
- 27 Lehman AC, Dumpert J, Wood NA, et al. Natural orifice cholecystectomy using a miniature robot. Surg Endosc, 2009, 23 (2):260-266.
- 28 Scott DJ, Tang SJ, Fernandez R, et al. Completely transvaginal NOTES cholecystectomy using magnetically anchored instruments. Surg Endosc, 2007, 21(12):2308-2316.
- 29 Raman JD, Bergs RA, Fernandez R, et al. Complete transvaginal NOTES nephrectomy using magnetically anchored instrumentation. J Endourol, 2009, 23(3):367-371.
- 30 Zygomalas A, Gkiokas K, Koutsouris DD. In silico development and simulation of a modular reconfigurable assembly micro-robot for use in natural orifice transluminal endoscopic surgery. Hell J Surg, 2011, 83(4):190-196.
- 31 Ruiter JG, Bonnema GM, Voort MC, et al. Robotic control of a traditional flexible endoscope for therapy. J Robotic Surg, 2013, 7 (3):227-234.
- 32 Wang Z, Sun Z, Phee SJ. Haptic feedback and control of a flexible surgical endoscopic robot. Comput Methods Programs Biomed, 2013, 112(2):260-271.
- 33 Höller K, Schneider A, Jahn J, et al. Spatial orientation in transluminal surgery. Minim Invasive Ther Allied Technol, 2010, 19 (5):262-273.
- 34 Smith K, Goldstein SC. Programmable matter: applications for gastrointestinal endoscopy and surgery. Gastroenterology, 2011, 140 (7):1884-1886.

(收稿日期:2013-09-01)

(修回日期:2014-02-14)

(责任编辑:李贺琼)

## • 书讯 •

## 《泌尿外科微创手术学》(第2版)

由北京大学第三医院马潞林教授主编的《泌尿外科微创手术学》(第2版)近期由人民卫生出版社出版发行,2013年12月15日以后全国各大书店有售。本书总结了近年来微创泌尿外科的新技术与新进展,详细讲解了泌尿外科腹腔镜、经皮肾镜、输尿管镜、纤维电子输尿管镜、经尿道内镜、精囊镜和显微男科手术等。

北京大学第三医院泌尿外科是卫生部国家临床重点专科,其微创泌尿外科学一直处于国内领先、国际一流水平。《泌尿外科微创手术学》一书,不仅凝聚了国内外微创外科领域的最新进展,而且阐述了国内多位专家学者的宝贵经验。本书非常侧重临床实用性,关注点集中在各种内镜手术的临床应用,书中对每种微创手术的解剖要点、理论知识、围手术期处理、手术操作步骤、相关并发症及对策,都有详细的讲解和分析。

图文并茂是本书的一大特色。北京大学第三医院泌尿外科通过多年的临床实践,积累了大量宝贵的临床资料。本书共搜集整理手术实景图片1000余幅,各类图片极具代表性,充分展示了手术的全貌,更便于读者借鉴参考。本书还附有DVD教学光盘,读者可以看到23种微创手术的实况录像。手术录像内容完整,细节详实,读者在结合理论学习的同时,可以更切实深入地体会各种手术的细节要领,提高手术技术。

《泌尿外科微创手术学》编纂的理念:使泌尿外科医师获得真正实用的临床参考资料。因此,具有一定临床工作经验的专业读者,完全可以参照此书亲自开展各种泌尿外科微创手术。